フローティングノズルを有する波力発電用ラジアルタービン

金野敏郎^{*1},長田至弘^{*1} 高尾学^{*2},瀬戸口俊明^{*3}

Radial Turbine with Floating Nozzle for Wave Energy Conversion

Toshio KONNO^{*4}, Yoshihiro NAGATA, Manabu TAKAO and Toshiaki SETOGUCHI

*⁴ Toyo Technology Inc.

1-2-31 Nakahara, Isogo-ku, Yokohama-shi, Kanagawa, 235-0036 Japan

The objective of this study is to propose a new radial flow turbine for wave energy conversion and to clarify its performance by model testing under steady flow condition. The proposed radial turbine has a rotor blade row for uni-directional airflow and two guide vane rows. The guide vane rows are named 'floating nozzle' in the study. The guide vane rows slide in an axial direction and work as nozzle in the turbine alternately for bi-directional airflow, so as to rectify bi-directional airflow and to make uni-directional airflow. The radial flow turbine with a diameter of 500mm has been manufactured and investigated experimentally under steady flow condition generated by a wind tunnel using a piston/cylinder system with a diameter of 1.4m. The turbine characteristics under sinusoidal flow conditions have been estimated by use of quasi-steady analysis. As a result, it has been found in the study that the peak efficiency of the proposed radial turbine is approximately 58% under steady flow conditions. Further, the effect of rotor blade profile and nozzle setting angle on the turbine performance was investigated and clarified in the study.

Key Words : Fluid Machinery, Natural Energy, Radial Turbine, Wave Energy Conversion

1. まえがき

波力発電用タービンの現在の主流は、ウエルズター ビン^{(1),(2)}など無弁式の空気タービンである.しかし、 これらのタービンは往復気流中で常に同一方向に回転 できるように、幾何形状をロータの回転中心面に対し 対称にしなければならず、一般にエネルギー変換効率 は在来のタービンに比べて低い.

一方,整流装置を有する波力発電用タービンについ ては,整流弁を用いる形式が一般的であり,弁機構の 保守にやや不安があるが在来のタービンが利用できる 利点がある.また,海洋波の波高が小さい場合にウエ ルズタービンより実績があることから,波高が比較的 小さい海域における波力発電装置の開発のため,この 方式によるタービンの研究や提案がなされている.整 流弁方式を採用した代表的な波力発電装置としては, 1965年に開発された航路標識用ブイ⁽³⁾があり,現在も 国内外で使用されている.この空気タービンには軸流 式衝動型タービンが使用され,最近ではこの翼列形状 の最適化に関する研究も実施されている⁽⁴⁾. さらに, 東北電力の水弁集約式波力発電装置⁽⁵⁾では 3 次元形状 を有する軸流式反動型タービンが使用されている. し かし,これらのタービンはいずれも軸流式であり, 整 流装置を有するラジアルタービンの開発は現在まで行 われていない.

本稿では、著者らが提案した新しい整流装置(これ をフローティングノズルと呼ぶことにする)を有する 波力発電用ラジアルタービンについて、その作動原理 を述べるとともに、3 種類のロータ翼型に対して定常 流を用いたタービン性能試験を実施し、その結果を示 す.また、準定常解析手法により非定常流中における タービン性能を予測する.

フローティングノズルを有する波力発電用ラジア ルタービンの作動原理

図1および図2は、それぞれ本研究で対象とするフ ローティングノズルを有する波力発電用ラジアルター ビンの外観と作動原理を示す.このタービンは、上側 と下側の2つのノズル翼列からなるフローティングノ ズルと1つのロータ翼列で構成される.波とともに空 気室内の振動水柱(OWC: Oscillating Water Column)が

^{*1} 東陽設計工業株式会社(〒235-0036 神奈川県横浜市磯子区中 原1丁目2番31号)

^{*2}松江工業高等専門学校 機械工学科

^{*3}佐賀大学 海洋エネルギー研究センター

E-mail: t-konno@tysk.co.jp



Fig. 1 Radial turbine with floating nozzle device

下降する吸込み時 {図 2(a)} においては、フローティ ングノズルも下降し、下側ストッパの位置で静止する。 そして、空気が大気から上側ノズルに向かって流れ、 ロータを経て、最終的に空気室に流入する.一方、振 動水柱が上昇する吐出し時 {図 2(b)}の場合、フロー ティングノズルも上昇し、上側ストッパの位置で静止 する.そして、空気は空気室から下側ノズルに流入し、 ロータを通過したのち大気に放出される.吸込み時、 吐出し時ともに空気は常にロータの外側から内側に流 入するため、ロータは常に同一方向に回転し、タービ ンが効率的に作動する.

なお、吐出し時{図 2(b)}においてフローティングノ ズルがその自重により所期の挙動を示さず往復気流を 整流できない可能性があるが、波の上下運動を模擬で きる波浪タンクによる実証試験において、その挙動に 及ぼす自重の影響はほとんどないことが確認されてい る⁽⁶⁾。

3. 実験装置と方法

実験装置の概要を図3に示す.実験方法は,文献(2), (4)と同じである. すなわち, 直径1.4m, 長さ1.7mの 円筒シリンダ内でコンピュータ制御によりボールネジ を回転させてピストンを駆動する往復気流発生風洞に タービン試験装置を接続し,定常流を発生させ,ター ビンの回転数を一定に保って実験を行った.実験に際 しては,タービン角速度 ω (≤ 168 rad/s),空気流量 Q(≤ 0.320 m³/s),案内羽根を含むタービン前後の全圧 差 Δp および出力トルク T_o を測定した.

供試ロータの詳細を図4および図5に示す.本研究 のロータ翼型としては図4に示す3種類を採用し、本 研究では図(a)から(c)の翼型をそれぞれS型,N型,K 型と呼ぶことにする.ここで、S型は波力発電用整流 弁方式型衝動タービン⁽⁴⁾と同様の翼型である.供試ロ ータの仕様は、全ての翼型に対して高さh:30mm、



(b) Exhalation











(b) Blade N



(c) Blade K

Fig. 4 Tested rotor blade

Table 1	Specifications	of rotor blade
---------	----------------	----------------

Blade	Chord length	Setting angle α°
S	55	30
N	60	56.5
K	80	58.5

平均半径 r_R: 225mm, 枚数: 23 である.また,弦長お よび取付角α (図5参照)を表1に示す.

供試案内羽根は、図5に示されるように弦長49.3mm,最 大厚み 6mm,前縁半径:3mm,後縁半径:0.5mm



Fig. 5 Configuration of turbine

の対称翼で、平均半径:263mm、枚数:36、平均半径 における弦節比:1.07 である.本研究では、タービン 性能に及ぼすノズル設定角 θ の影響を調べるため、103° $\leq \theta \leq 115^{\circ}$ の範囲で実験を行った.

なお、本研究では研究の第一段階として定常流での タービン性能を明らかするため、1 つのノズル翼列の みを使用し、それを固定して実験を行った.

4. 実験結果と考察

定常流におけるタービン特性を、次式で定義するト ルク係数 $C_{\rm T}$,入力係数 $C_{\rm A}$,効率 η と流量係数 ϕ の関係 により評価する.

$$C_{\rm T} = T_{\rm o} / \{ \rho (v_{\rm r}^2 + U_{\rm R}^2) A_{\rm R} r_{\rm R} / 2 \}$$
(1)

$$C_{\rm A} = \Delta p Q / \{ \rho (v_{\rm r}^2 + U_{\rm R}^2) A_{\rm R} v_{\rm R} / 2 \}$$

= $\Delta p / \{ \rho (v_{\rm r}^2 + U_{\rm R}^2) / 2 \}$ (2)

 $\eta = T_{\rm o}\omega(\Delta pQ) = C_{\rm T}/(C_{\rm A}\phi) \tag{3}$

$$\phi = v_{\rm R} / U_{\rm R} \tag{4}$$

ここに、 $A_{\rm R}$ 、 $v_{\rm R}$ 、 $U_{\rm R}$ は、それぞれロータがない場合の $r_{\rm R}$ における流路面積(= $2\pi r_{\rm R}h$)、気流の半径方向速度 と、 $r_{\rm R}$ におけるロータ周速度である.

図6から図8は、3種類のロータ翼型について、タ ービン特性に及ぼすノズル設定角のの影響を示す.ま た図9は、各翼型について最高効率ŋpeakに及ぼすノズ ル設定角の影響を表す.図6(a)、7(a)、8(a)より、ト ルク係数 C_Tは翼型に関係なくのの増加とともに減少す ることがわかる.これは、ロータ入口における絶対流 入速度の旋回方向成分がのの増加とともに減少するた



Fig. 6 Effect of nozzle setting angle on turbine characteristics under steady flow conditions (Blade S)

めと思われる。一方、図 6(b)、7(b)、8(b)より、 C_{T} 値と 同様に入力係数 C_{A} についても θ の増加とともに減少す ることがわかる.これは、 θ が小さいほどノズルの全 閉状態 (θ =96.6°) に近づき、タービン前後の差圧が大 きくなるためと思われる.一方、図 6(c)、7(c)、8(c)お よび図 9 に示す各翼型の η - ϕ 特性において、 η_{peak} は θ と



Fig. 7 Effect of nozzle setting angle on turbine characteristics under steady flow conditions (Blade N)

ともに増加し、S型は θ =107°で 0.571、N型とK型は θ =109°のときそれぞれ 0.578、0.585 で最大値となり、 それらより大きな θ では η_{pack} は減少している.また、 η_{pack} における流量係数は θ とともに増加し、さらに θ が 大きいほうが流量係数が高い領域においては比較的高 い効率を示している.これらの特性は、 C_{Γ} - ϕ 、 C_{Λ} - ϕ 曲



Fig. 8 Effect of nozzle setting angle on turbine characteristics under steady flow conditions (Blade K)

線および式(3)に起因する.また上述の通り η_{pack}は K 型 が最も大きいが,流量係数の高い領域においては S 型 の効率が 3 種類の翼型の中で最も大きく,不規則波で タービンが作動する実際の海洋ではこの翼型が有利で あると予想される.しかしながら,実際の波力発電用 タービンは往復気流中で作動するため,定常流におけ



Fig. 9 Effect of nozzle setting angle on peak efficiency under steady conditions

るタービン特性のみでは翼型の評価は困難である.次 章では、本章で得られたタービン特性を用いた準定常 解析手法⁽²⁾によりタービンの起動および作動特性を求 め、その結果から翼型の性能評価を行う.

5. 非定常流におけるタービン特性

海洋の波の運動は比較的変化が遅い現象であり,無 次元周波数は10³と非常に小さいことから,非定常流 における波力発電用空気タービンの性能は準定常解析 手法⁽²⁾によって予測可能と考えられる.そこで,実験 で得られた結果(図6~図8)を準定常的に用いて,非 定常流中におけるタービンの作動特性と起動特性の数 値シミュレーションを行った.

本解析では式(5)のような周期的往復流を仮定し、周期および往復気流の最大速度をそれぞれ T=10[s], $V_{R}=8.9[m/s]$ とする.

$$v_{\rm R} = V_{\rm R} {\rm Sin}(2\pi t/T) \tag{5}$$

ここで、tは時間である.タービンの作動特性は、次 式で計算される波の1周期における平均効率 η_m と流量 係数 Φ との関係より評価する.

$$\eta_{\rm m} = \left(\frac{1}{T} \int_0^T T_0 \omega dt\right) / \left(\frac{1}{T} \int_0^T \Delta p Q dt\right)$$
(6)

$$\Phi = V_{\rm R} / U_{\rm R} \tag{7}$$

タービンの起動特性は、次式で与えられる回転軸まわ りのロータの運動方程式を初期値問題として、ルン



(c) Blade K

Fig. 10 Effect of nozzle setting angle on mean efficiency under sinusoidal flow conditions

ゲ・クッタ・ギル法で解くことにより得られるタービンの挙動によって評価した.

$$I \frac{\mathrm{d}\omega}{\mathrm{d}t} + T_{\mathrm{L}} = T_{\mathrm{o}} \tag{8}$$

ここで、 $I: ロータの慣性モーメント, T_L: 負荷トルク である.本解析では、無負荷状態(<math>T_L=0$)とし、図 9(a)



(a) Blade S



(b) Blade N



Fig. 11 Effect of nozzle setting angle on starting characteristics under sinusoidal flow conditions

の結果を利用して無次元角速度 ω^* (= $T\omega$) と無次元時間 t^* (=t/T)の関係を求めた.なお、本研究では全ての 翼型についてロータの慣性モーメントを $I=0.0828 \text{kgm}^2$ として計算した.

図 10 はタービンの作動特性に及ぼす翼型とノズル 設定角の影響である.定常流での実験結果と同様に 全ての翼型において最高効率はθともに増加する. そして, S型はθ=107°で0.524, N型はθ=109°で0.533, K 型はθ=111°で0.540と, それぞれ最大値となり, それらより大きなθでは最高効率はθの増加とともに減少している. これより, 最高効率はK型が最も大きいことがわかるが, 一方で流量係数が高い領域ではS型の効率が高く, 不規則波が生じる実際の海洋ではS型が最も有利であると推測される.

図 11 はタービンの起動特性に及ぼす翼型とノズル設定角の影響である.ここで、流量係数が高い領域で比較的高い効率を示している 0~2107°の結果のみ示している.図より、全ての翼型、ノズル設定角において短時間で起動し、回転数は準定常の無拘束状態に到達している.また、のつ増加とともに準定常の無拘束回転数は減少しているが、これはその回転数が C₁-の曲線の C₁=0 となる 0 値に依存するためである.一方、S型の場合が最も回転数が低く、タービンの低速化の観点より S型が最も好適な翼型と考えられる.

上記の結果より、フローティングノズルを有する波 力発電用ラジアルタービンに好適な翼型はS型であり、 またノズル設定角のは、幅広い流量係数の範囲で比較 的効率が高い109°程度が好適であると考えられる.

6. まとめ

本研究では、著者らが提案したフローティングノズ ルを有する波力発電用ラジアルタービンの性能試験を 実施し、研究の第一段階として1つのノズル翼列のみ を使用した場合の定常流におけるタービン性能を明ら かにした.また、実験で得られたタービン特性を用い た準定常解析手法により、タービンの作動特性および 起動特性に及ぼす翼型とロータ設定角の影響を求めた.

その結果、本研究で実験した範囲では、フローティ ングノズルを有する波力発電用ラジアルタービンに好 適な翼型は S型 {図 4 参照} であり、ノズル設定角 (図 5 参照) は 109°程度が望ましい.

文 献

- (1) 井上雅弘・ほか2名,"ウェルズタービンに関する研究(第2報,定常性能試験によるロータ形状の選定)", 機論,50-459,B(1984),2599-2605.
- (2) 瀬戸口俊明・ほか5名,"波力発電用諸タービンの性能比較", 機論, 65-634, B(1999), 2063-2070.
- (3) 勝原光治郎・ほか3名,"灯標用波浪発電装置におけるエアータービンの特性-衝動型・ウェルズ型・サボニウス型-",第2回波浪エネルギー利用シンポジウム講演論文集,海洋科学技術センター,(1987),83-91.
- (4) 前田英昭・ほか4名,"波力発電用整流弁方式型衝動 タービンに関する研究",機論, 66(646), B (2000), 1421-1427.
- (5) 小宮俊夫, "水弁集約式波力発電システムの開発", 三井造船技報, 160, (1997), 17-19.
- (6) http://www.tysk.co.jp/turbine.html